

磁光材料和磁光器件

刘湘林
刘公强 编著
金绥更

北京科学技术出版社

磁光材料和磁光器件

刘湘林 刘公强 金绥更 编著

北京科学技术出版社

磁光材料和磁光器件

刘湘林 刘公强 金绥更 编著

*

北京科学技术出版社出版

(北京西直门外南路19号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京顺义牛栏山印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7.5印张 159千字

1990年1月第一版 1990年1月第一次印刷

印数1—1500册

ISBN 7-5304-0502-0/T·102 定价: 3.50元

内 容 提 要

磁光材料和器件是一类新型的光信息功能材料和器件，在激光、光电子学、光纤通讯、光计算机、光信息存储、激光陀螺等尖端技术以及固体物理基础研究中有着广泛的应用。本书介绍磁光材料的物理性能、测试、生长工艺和应用，反映磁光材料和器件方面近年来的新进展。

全书分4章，首先扼要阐述磁光效应；接着介绍磁光材料，包括石榴石单晶和薄膜、稀土—过渡金属非晶薄膜、锰铋型金属间化合物，热压尖晶石、磁光玻璃等；较详细介绍各种磁光器件的工作原理和近年来的新进展；最后概述一些磁光性能的测试。

本书可供从事固体物理、磁学、光学和磁光材料及器件方面工作的科技人员，工人以及高等院校有关专业的师生参考。

前 言

在磁场的作用下,物质的电磁特性(如磁导率、介电常数、磁化强度、磁畴结构、磁化方向等)会发生变化,因而使通过它的光的传输特性(如偏振状态、光强、相位、频率、传输方向等)也随之发生变化。光在磁场作用下通过这些物质时传输特性的变化称为磁光效应。

磁光材料是指在紫外到红外波段具有磁光效应的光信息功能材料,利用这类材料的磁光特性以及光、电、磁的相互作用和转换,可构成具有光调制、光隔离、光开关、光偏转、光信息处理、光显示、光录像、光存储、光复制、光偏频以及其它光电磁转换功能的磁光器件。磁光材料及其应用不仅有力地推动了磁光效应的研究,而且促进了激光、光电子学、光通讯、计算、记录、信息和激光陀螺等新技术的发展,从而日益引起人们的重视。

早在1845年法拉第(Faraday)首先发现了平面偏振光通过沿光传输方向磁化的介质时,偏振面产生旋转的现象,后来人们称之为法拉第效应,这就是人类历史上最早发现的一种磁光效应。随后相继发现了克尔(Kerr)效应(1876年),塞曼(Zeeman)效应(1897年),瓦格特(Voigt)效应及科顿-穆顿(Cotton-Mouton)效应(1907年)等。研究最多、应用最广的是法拉第效应,其次是克尔效应。1845至1960年期间,人们对磁光效应的研究,仅限于现象的发现、实验数据的积累及理论的建立和发展。直到60年代初,由于激光的诞生以及后来光电子学领域的开拓,许多新

型磁光材料和器件应运而生，使磁光效应的研究进入空前发展时期，并在许多新技术领域获得了日益广泛的应用，从而一门新兴分支学科——磁光学科（包括磁光效应、磁光理论、磁光材料、磁光测量、磁光器件、磁光光谱学等）基本形成了。

利用材料的磁光特性，通过偏光显微镜可以直接观察磁畴，研究磁畴结构与材料磁性的关系，以及磁畴与缺陷的相互作用，从而发现新的磁性材料和器件。人们熟悉的磁泡存储器，就是在磁泡畴研究的基础上发展起来，并成为当代一种有竞争力的大容量、非挥发、全固态型存储系统。通过磁光材料还可以作基础研究，探索物质结构和能谱的关系，推动磁光谱学的发展；利用磁光效应观察磁畴结构、磁共振模式，各种磁光谱线，测定若干磁参量（如磁化强度、磁各向异性，磁滞回线，磁导率，磁光常数，畴壁能、畴壁迁移率矫顽力等）和其它参量（如电流强度、电阻率、介电常数、磁转变温度、缺陷、相变动力学过程等），为基础研究提供大量有价值的信息。随着各种磁光器件可直接用于许多尖端技术，又促进磁光效应的深入研究，两者相互影响，相得益彰。

基于磁光材料及器件的迅速发展及其对“四化”建设的重要意义，我们编著《磁光材料和磁光器件》一书，旨在普及磁光知识，反映磁光材料及器件近年来的新进展，以提供从事固体物理、磁学、光学和磁光材料及器件方面工作的科技人员、工人以及高等院校有关专业师生参考。

全书分四章，第一章扼要阐述磁光效应，第二章介绍磁光材料，第三章介绍磁光器件，最后一章概述一些磁光性能的测试。

沈德芳、阮元绩、王洪祥、朱正中同志参加了本书的部

分编写工作；不少同志对本书提出许多宝贵意见，在此深表感谢。

由于作者水平有限，书中缺点、错误实在难免，谨请读者批评指正。

编著者

1987年10月于上海

目 录

第一章 磁光效应	(1)
§ 1-1 引言	(1)
§ 1-2 光和磁的一些概念	(1)
1-2-1 光的偏振	(1)
1-2-2 磁畴和磁化	(4)
§ 1-3 磁光效应的经典理论及分类	(8)
1-3-1 法拉第效应和磁圆振二向色性	(8)
1-3-2 磁线振双折射和磁线振二向色性	(21)
1-3-3 克尔效应	(23)
1-3-4 塞曼效应	(26)
1-3-5 磁激发光散射	(28)
第二章 磁光材料	(30)
§ 2-1 引言	(30)
§ 2-2 石榴石单晶	(32)
2-2-1 晶体结构和元素替代	(32)
2-2-2 石榴石单晶的生长	(39)
2-2-3 石榴石单晶的磁光性能	(42)
§ 2-3 石榴石单晶薄膜	(47)
2-3-1 石榴石单晶薄膜的制备	(47)
2-3-2 液相外延生长实例	(49)
2-3-3 石榴石单晶薄膜的磁光性能	(55)
§ 2-4 稀土过渡族金属非晶薄膜	(59)
2-4-1 非晶磁性材料概述	(59)
2-4-2 稀土过渡族金属非晶薄膜的制备	(61)

2—4—3	稀土过渡族金属非晶薄膜的磁性能	(64)
2—4—4	稀土过渡族金属非晶薄膜的磁光和霍耳效应	(66)
§ 2—5	锰铋型合金薄膜	(68)
2—5—1	引言	(68)
2—5—2	MnBi薄膜制备工艺和性能的关系	(68)
2—5—3	MnBi薄膜的磁光性能	(72)
2—5—4	三元MnBi型合金薄膜	(76)
§ 2—6	尖晶石型硫属化合物	(81)
2—6—1	尖晶石硫属化合物的制备	(81)
2—6—2	制备工艺对材料的影响	(82)
2—6—3	尖晶石型硫属化合物的磁光性能	(85)
§ 2—7	磁光玻璃	(87)
§ 2—8	其它磁光材料	(91)
2—8—1	EuX型化合物	(91)
2—8—2	CrY ₃ 型化合物	(92)
2—8—3	MF ₃ 型化合物	(92)
2—8—4	AMF ₃ 型化合物	(94)
2—8—5	FeBO ₃	(94)
2—8—6	RFeO ₃ 型化合物	(94)
2—8—7	Eu ₂ SiO ₄	(95)
2—8—8	Na ₅ M ₃ F ₁₄ 型化合物	(95)
2—8—9	铁磁玻璃	(95)
第三章	磁光器件	(96)
§ 3—1	引言	(96)
§ 3—2	磁光调制器	(98)
3—2—1	工作原理	(98)
3—2—2	石榴石单晶薄膜磁光调制器	(100)
3—2—3	钇铁石榴石单晶磁光调制器	(103)

3—2—4 玻璃磁光调制器	(111)
§ 3—3 磁光隔离器和磁光开关	(111)
3—3—1 工作原理	(111)
3—3—2 YIG磁光隔离器	(113)
3—3—3 其他磁光隔离器	(117)
§ 3—4 磁光环行器	(118)
3—4—1 偏振无关光环行器的产生	(118)
3—4—2 偏振棱镜的原理和结构	(119)
3—4—3 光环行器的结构和原理	(121)
3—4—4 光环行器的特性	(121)
3—4—5 激光稳定试验	(123)
§ 3—5 薄膜波导磁光调制器	(125)
3—5—1 磁光调制的模式耦合理论	(125)
3—5—2 蛇形线路式磁光波导开关和调制器	(129)
3—5—3 周期结构式磁光波导开关和调制器	(132)
3—5—4 磁性交替相位光栅式耦合器—调制器	(134)
§ 3—6 薄膜波导非互易磁光器件	(135)
3—6—1 非互易模式转换理论	(135)
3—6—2 磁光波导隔离器	(137)
3—6—3 双外延石榴石波导隔离器	(138)
3—6—4 磁光薄膜波导回转器	(140)
3—6—5 磁光波导环行器	(140)
§ 3—7 磁光电流测试仪	(141)
3—7—1 应用背景和工作原理	(141)
3—7—2 光路结构和检测方法	(143)
3—7—3 线路设计、补偿和匹配	(144)
3—7—4 光纤传输磁光电流测试仪	(148)
§ 3—8 磁光偏频激光陀螺	(151)
3—8—1 激光陀螺的发展概况	(151)

3-8-2	工作原理和磁光偏频	(152)
3-8-3	磁光在激光陀螺中的应用	(155)
3-8-4	磁光偏频材料	(157)
3-8-2	多层的介电—磁镜	(159)
§ 3-9	磁光存储	(163)
3-9-1	磁光存储的发展	(163)
3-9-2	磁光记录原理	(165)
3-9-3	磁光存储材料	(167)
3-9-4	多通道磁光存储器	(171)
3-9-5	磁光光盘存储系统	(175)
3-9-6	磁光全息存储	(176)
§ 3-10	磁光显示器	(178)
§ 3-11	磁光偏转器	(180)
§ 3-12	其他磁光器件及其应用	(184)
3-12-1	磁光复制	(184)
3-12-2	磁光信息处理机	(187)
3-12-3	磁光非接触印刷机	(189)
3-12-4	磁光录像机	(191)
3-12-5	磁光读出头	(191)
第四章	磁光效应的测量	(193)
§ 4-1	预备知识	(193)
§ 4-2	法拉第旋转和椭圆率 (磁圆双折射和二向色性) 的测量	(195)
§ 4-3	磁线振双折射及二向色性的测量	(204)
§ 4-4	克尔效应的测量	(205)
4-4-1	用椭偏仪测量普通光学常数	(207)
4-4-2	用椭偏仪测量横向克尔效应	(210)
4-4-3	纵向克尔效应的测量	(214)
4-4-4	极向克尔效应的测量	(221)

IV.

第一章 磁光效应

§ 1-1 引言

有些物质，如顺磁性、磁性、反铁磁性和亚铁磁性物质的内部，具有原子或离子磁矩。这些具有固有磁矩的物质在外磁场的作用下，电磁特性会发生变化，因而使光波在其内部的传输特性也发生变化，这种现象称为磁光效应。

有些物质，如逆磁性物质内部，没有固有的原子或离子磁矩，但这种物质处于外磁场中时，将使其内部的电子轨道产生附加的拉莫进动。这一进动具有相应的角动量和相应的磁矩，从而亦能使光波在其内部传播的特性发生变化，但这种物质产生的磁光效应远较铁磁性和亚铁磁性物质的微弱。

磁光效应，包括法拉第效应、克尔效应、磁线振双折射（科顿—穆顿效应和瓦格特效应）、磁圆振二向色性、磁线振二向色性，塞曼效应和磁激发光散射等，其中最为人们所熟悉，而且亦最有用的是法拉第效应。

为讨论磁光效应的需要，本章将首先概述一些光和磁的基本概念：如光的偏振、磁畴和磁化等，随后将对各种磁光效应分别加以较为详细的叙述。

§ 1-2 光和磁的一些概念

1-2-1 光的偏振

设一单色平面光波沿 Z 方向传播，根据光的横波性，可

将其电矢量 $\vec{E}$ 写成:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_{ox} \cos(\varphi_x - \omega t) \\ E_y &= E_{oy} \cos(\varphi_y - \omega t) \\ E_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

消去 (1-1) 式中的 t , 整理得:

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}} \right)^2 - 2 \times \frac{E_x}{E_{ox}} \times \frac{E_y}{E_{oy}} \cos \varphi = \sin^2 \varphi \quad (1-2)$$

式中 $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ 。(1-2) 式为一椭圆方程, 这表明 (1-1) 式所描写的是一个椭圆偏振光。当

$$\begin{aligned} E_{ox} &= E_{oy} = A \\ \varphi &= m \cdot (\pi/2) \quad m = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots \end{aligned}$$

时, (1-2) 式变成:

$$E_x^2 + E_y^2 = A^2 \quad (1-3)$$

(1-3) 式代表半径为 A 的圆, 这种光波称为圆偏振光。圆偏振光有右旋圆偏振光和左旋圆偏振光两种, 其“旋向”由 φ 的变化, 而不是由 ωt 或 φ_x 的变化来确定。当

$$\varphi = -\frac{\pi}{2} + 2n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

时, 由 (1-1) 式得

$$\left. \begin{aligned} E_x &= A \cdot \cos(\varphi_x - \omega t) \\ E_y &= A \cdot \cos(\varphi + \varphi_x - \omega t) \\ &= A \cdot \sin(\varphi_x - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

为一右旋圆偏振光。当

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + 2n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

时, 由 (1-1) 式得:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= A \cdot \cos(\varphi_x - \omega t) \\ E_y &= -A \cdot \sin(\varphi_x - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

为一左旋圆偏振光。当

$$\varphi = n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

时, (1-2) 式变为

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^n \frac{E_{oy}}{E_{ox}} \quad (1-6)$$

(1-6) 式为一直线方程, 对应的光波称为平面偏振光, 或称为线偏振光。如果电矢量的偏振方向平行于X轴, 这就是TM(transverse magnetic)波 ($E_y = 0$); 电矢量的偏振方向平行于Y轴, 这就是TE(transverse electric)波 ($E_x = 0$)。

鉴于 $e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha$, $\cos\alpha = R_e e^{i\alpha}$, 光波可用复数来表示。如 $E_x = E_{ox} \cos(\varphi_x - \omega t)$ 可表示为 $E_x = E_{ox} e^{i(\varphi_x - \omega t)}$ 只需注意的是, 其中的实数部分才是原来的波的形式。我们将 (1-1) 式改写成

$$\begin{aligned} E_x &= R_e E_{ox} e^{i(\varphi_x - \omega t)} \\ E_y &= R_e E_{oy} e^{i(\varphi_y - \omega t)} \\ &= R_e E_{oy} e^{i\varphi} e^{i(\varphi_x - \omega t)} \end{aligned}$$

当用复数表示时, 则可写成

$$\frac{E_y}{E_x} = \frac{E_{oy}}{E_{ox}} e^{i\varphi} \quad (1-7)$$

为一椭圆偏振光。当

$$\varphi = -\frac{\pi}{2} + 2n\pi \quad E_{ox} = E_{oy} = A \text{ 时 (1-7) 式变为}$$

$$\frac{E_y}{E_x} = -i \quad (1-8)$$

为一右旋圆偏振光。当 $\varphi = \frac{\pi}{2} + 2n\pi$, 且 $E_{ox} = E_{oy} = A$ 时,

(1-7) 式变为

$$\frac{E_y}{E_x} = i \quad (1-9)$$

为一左旋圆偏振光。当 $\varphi = n\pi$ 时, (1-7) 式变为

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^n \frac{E_{oy}}{E_{ox}} \quad (1-10)$$

为一线偏振光

1-2-2 磁畴和磁化

物质由原子、分子、离子组成,有些原子或离子,如 Fe、Co、Ni、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Pr^{3+} 等具有一定大小的磁矩,由这些磁性原子、离子组成的合金和化合物,通常具有很强的磁性。具有强磁性的物质称为磁性物质。

人们发现,在磁性物质内部,有许许多多小区域。在每一个小区域内,由于原子或离子之间具有很强的电的和磁的相互作用,所有的原子或离子磁矩都互相平行、整齐地排列起来,我们称这种小区域为磁畴。因为各磁畴的磁矩方向是不相同的,因此对外作用互相抵消,宏观上并不显示出磁性(图 1-1a)。若沿物体的某一方向施加一个不大的磁场,物体内的各磁畴磁矩会从各个不同的方向,转到磁场方向或接近磁场方向,因而在磁场方向存在磁矩的联合分量,这样对外就显示出磁性(图 1-1b),这时我们称物体被外磁场磁化了。单位体积内各个磁畴磁矩的矢量和叫做磁化强度矢量,用 M 表示。当施加的外加磁场足够大,以致所有的磁畴磁矩都沿外磁场方向排列(此时磁畴消失了,如图 1-1c 所示),再增加外磁场也不能增强磁化,这时我们就说物体磁化达到饱和了, $M \rightarrow M_s$, M_s 称为饱和磁化强度。

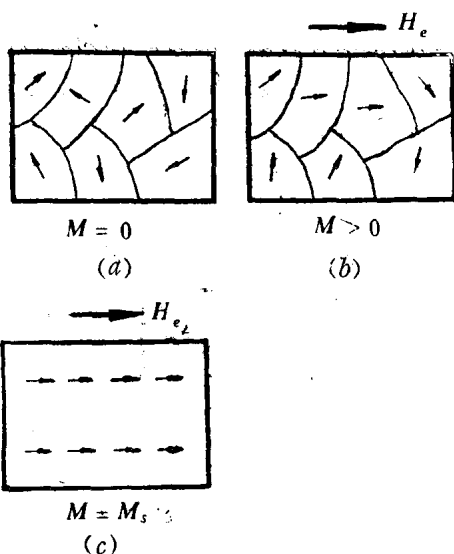


图1-1 物体在磁场中磁化

外加磁场的方向不同，有些物体沿不同方向磁化的情形是不同的，我们称这种现象为磁性的各向异性。这主要是由下列三种因素造成的。

(1) 结构上的各向异性 在晶体中，原子的排列是有规则的，在各个方向上排列的状况是不相同的。如在简单立方晶体中，沿 $[100]$ 方向的原子排列比较紧密，而沿 $[111]$ 方向的原子排列就比较稀疏。又如在两种以上原子构成的晶体中，在某一方向排成直线的是同一种原子，在另一方向排成直线的是两种以上的原子。这些状况属于结构上的各向异性。由于结构上的各向异性，磁性晶体磁化时，在磁性上亦会表现出各向异性，这种现象称为磁晶各向异性。

例如，铁单晶属立方晶系（图 1-2）。在 $[100]$ 方向加不大的磁场，磁化就会达到饱和，在 $[110]$ 方向加同样大小的磁场，磁化就不如 $[100]$ 方向强，而在 $[111]$ 方向，磁化

则更弱了。我们把最容易磁化的方向称为易磁化方向，如铁单晶中的 $[100]$ 方向；最难磁化的方向称为难磁化方向，如铁单晶中的 $[111]$ 方向

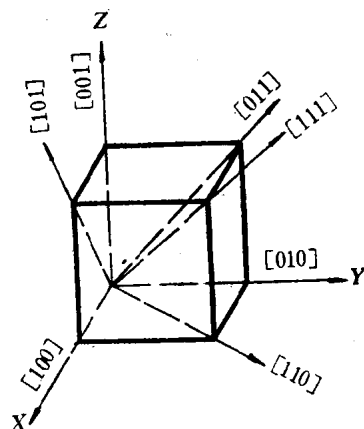


图 1-2 立方晶体

(2) 形状上的各向异性 磁性物体磁化后，在物体的端面会出现N、S两个磁极，如图1-3a所示。这样，在物体内部就会产生一种磁场 H_d ，其方向与外磁场 H_e 方向相反或接近相反，因而有减退磁化的作用，故 H_d 称为退磁场。真正作用在物体内部的磁场强度 H_i 为

$$H_i = H_e + H_d$$

在数值上， H_d 越大， H_i 就比 H_e 小得越多，这表明物体越难磁化。

退磁场 H_d 一般是不均匀的。可是在椭球中，如果磁化均匀，其内部的 H_d 则是均匀的，且 H_d 大小与内部的磁化程度 M 成正比，方向与 M 相反。 $H_d = -NM$ ， N 称为退磁因子。椭球在三个主轴上的退磁因子 N_x ， N_y 和 N_z 有以下关系：

$N_x + N_y + N_z = 1$ 。 N 的数值决定于物体的几何形状。通常物